

論文

[1141] 鉄筋コンクリート橋の部位の違いによる材料劣化に関する考察

今井富士夫*1・中沢 隆雄*1・赤木 正見*2・枝元 宏彰*3

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を考える上で、コンクリートの中性化状況や塩分分布あるいはこれらと圧縮強度などの関係を把握することは重要である。これまでの研究から、コンクリートの中性化には材料や配合ならびに外気など数多くの要因があり、これらの要因のうち、配合では水セメント比、外的要因としては気温、湿度や炭酸ガス濃度などが挙げられ、これらを因子とする中性化深さ予測式も提案されている[1、2、3]。また、中性化は構造物内部の塩分分布に影響を及ぼし[4、5]、コンクリートの圧縮強度や吸水率とも関連していることも指摘されている。しかしながら、これらの成果の多くは促進試験などを基としたものが多く、実構造物からのデータは不十分なように思われる。

著者らは先に、異なった環境条件下で多年供用されてきたコンクリート構造物(7体)の上記に関するデータを提示し[6]、中性化速度あるいは圧縮強度や吸水率に対する中性化速度の関係ならびに可溶性塩分の分布状況などを明らかにした。しかしながら、降雨や外気条件に影響を受ける中性化進行やそれに伴っての塩分移動があることを考えれば、同一条件で打設され、同一環境で供用された1つの橋梁でも部位によってこれらは変化するはずである。本論文は、このような観点から供用51年の1つの鉄筋コンクリートT桁橋から抽出された様々な部位の試験片による材料試験を行い、その結果から部位の違いによる材料劣化の変化について考察するものである。

2. 調査対象桁

2.1 試料採取桁とその環境

調査対象とした構造物は図-1に示すような鉄筋コンクリートT桁橋で、宮崎県日南市北部の細田川河口部にあり、海岸線より500m内陸部で海から遮蔽物のない状況に位置していた。試料は本橋の両耳桁(G1桁とG4桁)から抽出された。その採取位置は図-2に示す、桁の支間1/4点(断面Lと断面R)と横桁近傍(断面C)である。

配合推定による結果は、単位セメント量: 212kgf/m³、単位骨材料: 1940kgf/m³、水セメント比: 71.7%であった。

表-1は日南市近傍の油津地方気象統計値で、統計年数は30年間

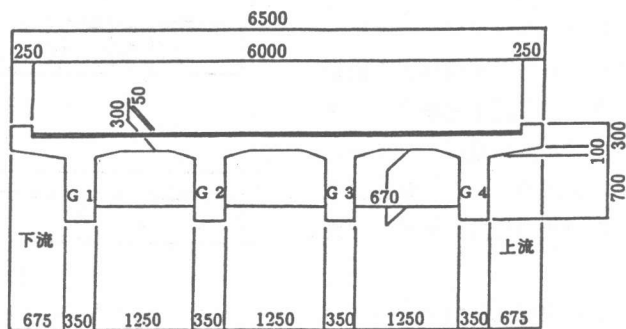


図-1 調査橋の断面図(単位: mm)

*1 宮崎大学助教授、工学部土木工学科、工博(正会員)

*2 宮崎大学技官 工学部土木工学科

*3 ㈱国土開発コンサルタント設計1部部长(正会員)

表-1 油津地方の気象統計値

項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均気温(°C)	8.1	9.2	12.1	16.5	19.6	23.0	26.7	27.1	24.4	20.0	15.0	10.0
平均湿度(%RH)	64	65	68	73	77	81	81	81	79	73	71	68
平均降水量(mm)	75	103	190	261	315	412	278	257	324	199	119	65

(気温に関しては18年間)の平均値である。月平均気温の変動は8.1°C~27.1°Cとなり、年間で約20°Cの開きがある。これらの年平均値については、平均気温は17.7°C、平均湿度は74%、平均降水量は2597mmである。

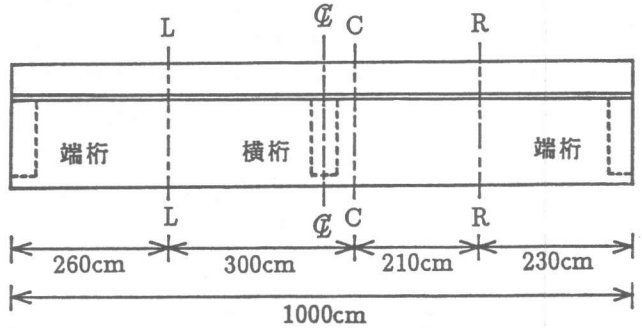


図-2 耳桁の試料採取位置

2.2 ひびわれ発生状況

図-3は試料を採取したG1桁と

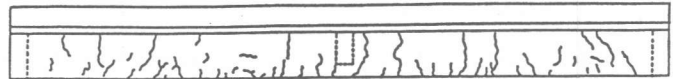
G4桁のひびわれ発生状況を示したものである。G4桁の図中の太線はひびわれ幅が0.2mm以上のものを示している。以後の考察では桁の両側面に対する比較を行うことになるので、簡単のため、橋梁全体の断面の中央部からみて内側となる側面を「内面」、外側を「外面」と定義する。

まず、両者の桁を比較すると、ひびわれはG1桁に多く分布しているが、G1桁には0.2mm以上のひびわれは存在していないようである。各桁の両側面を比較してみると、いずれの桁とも桁外面に比べて内面にひびわれが多く分散していることが確認できる。特にG4桁の内面には主鉄筋に沿う0.2mm以上の幅の過大な水平ひびわれが生じている。しかしながら、いずれの桁にも遊離石灰の析出や鉄筋の錆汁などは検出されなかった。

現場でのコンクリートはつりによる鉄筋腐食状況を観察すると、鉄筋は主鉄筋、スタラップともに錆が生じていることが確認できた。なお、主鉄筋のかぶりは40mmであった。

3. 中性化について

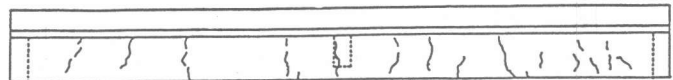
コンクリートの中性化進行はこれまでの報告から気温や湿度に影響されることが明らかとなっている。このことから、ほぼ同一の材料を使用し



(a) G1 桁の外面



(b) G1 桁の内面



(c) G4 桁の外面



(d) G4 桁の内面

図-3 ひびわれ状況

ている1つの橋梁でも異なる部位では日照条件や降雨、風などにより、中性化進行は違ったものになることが予測できる。本章ではこのような観点から、異なる部位の試料による中性化深さを測定した。中性化深さは抜き取ったコアの割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し、発色点までの長さとした。以後の考察ではその平均を中性化深さとしている。

図-4は2つの桁の中性化深さと桁の高さ方向の試料採取位置との関係を示したものである。図中の○と●は測定値で、これらは大きくなればつきを呈している。これらを直線回帰すると、実線(G4桁)と破線(G1桁)のようになり、回帰線から考察すると、以下ようになる。上流側に位置するG4桁のほうがG1桁に比べて中性化は大きく進行するようである。この理由としては、上流側は西向きであるため、東向きの下流側よりも強い日射を長く受けるためと考えられる。桁の高さ方向についてみると、いずれの桁も底部の中性化が速く、上部にいくに伴ってその進行は低減する傾向にある。

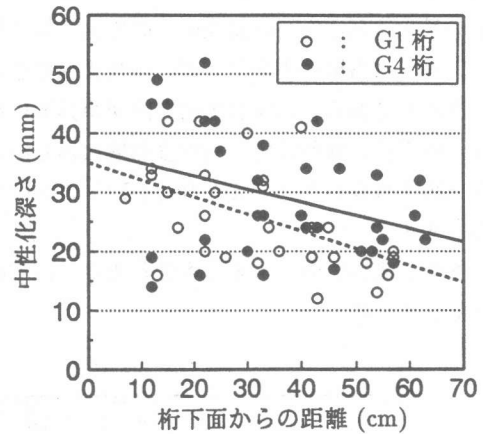


図-4 中性化深さと採取位置との関係 (G1桁とG4桁の比較)

中性化深さの推定法は岸谷式[1]を始め、幾つか提案されている。最近の研究では、気温や炭酸ガス濃度の影響も考慮した魚本・高田式[3]ならびにこれらに湿度を含めた鄭・平井・三橋の式[2]などがある。ここでは、岸谷ならびに魚本・高田の推定式による理論値と本試験結果との比較を試みる。以下の考察では岸谷式の推定値は岸谷値、魚本・高田式によるものは魚本値と称する。両者の式を示すと以下ようになる。

岸谷式：

$$\left. \begin{aligned} t &= 0.3(1.15+3W_c)/R^2(W_c-0.25)^2 \cdot X^2 & (W_c \geq 0.6) \\ t &= 7.2/R^2(4.6W_c-1.76)^2 \cdot X^2 & (W_c \leq 0.6) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

魚本・高田式：

$$\left. \begin{aligned} \text{1次式} &: X = D \cdot (2.94W_c - 101.2) \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{Ct} \\ \text{2次式} &: X = D \cdot (2.94W_c - 101.2) \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{Ct} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $D = (2.804 - 0.847 \cdot \log C) \cdot e^{(8.748 - 2563/T)}$ 、 X は中性化深さ、 W_c は水セメント比、 t は経過時間、 C は炭酸ガス濃度(%）、 T は絶対温度、 R は中性化比率(表-2の計算では $R=1$ とした)である。なお、 X 、 W_c と t の単位はそれぞれ、式(1)ではcm、百分率、年であり、式(2)ではmm、%、週である。

表-2は2つの式による計算結果を示したもので、表中の低温期と高温期とはそれぞれ年平均以下と以上の気温の時期を意味しており、算定に必要なデータはこれらの時期の平均値を用いている。ただし、

表-2 中性化深さ(mm)の理論値

		年平均	低温期	高温期
岸谷		34	34	34
魚本・高田	1次	40	34	48
	2次	42	35	50

注) 低温期は1月~4月、11月と12月
高温期は5月~10月

魚本・高田式での炭酸ガス濃度は0.035%とした。

表から明らかなように、低温期（気温：11.8℃）では両者の値はほぼ一致するものの、年平均（気温：17.7℃）や高温期（気温23.5℃）では気温を考慮できる魚本値は岸谷値よりも大きくなる。表-2の理論値と図-4の試験結果を比較すると、岸谷値は全体の測定値（平均値：27.4mm、標準偏差：9.8mm）の偏差領域の上界を示しているが、魚本値は、年平均温度によるものではG1桁の最大実測値を、高温期のものでは全体の最大実測値を示すようである。

図-5は各桁の内面と外面の中性化深さをみたものである。図中の実線は外面の、破線は内面の回帰線である。いずれの桁も内面が外面に比べて、中性化は速くなっている。この理由としては、内面は比較的安定した湿度環境にあるが、外面は降雨による湿潤と直接日射の乾燥を繰り返すためではないかと考えられる[7]。この中性化進行の傾向は、図-3に示したびびわれ状況と符合する。

また、高さ方向に対する中性化の進行は、前述した桁全体のものと同様に、底部から上部へと低減している。

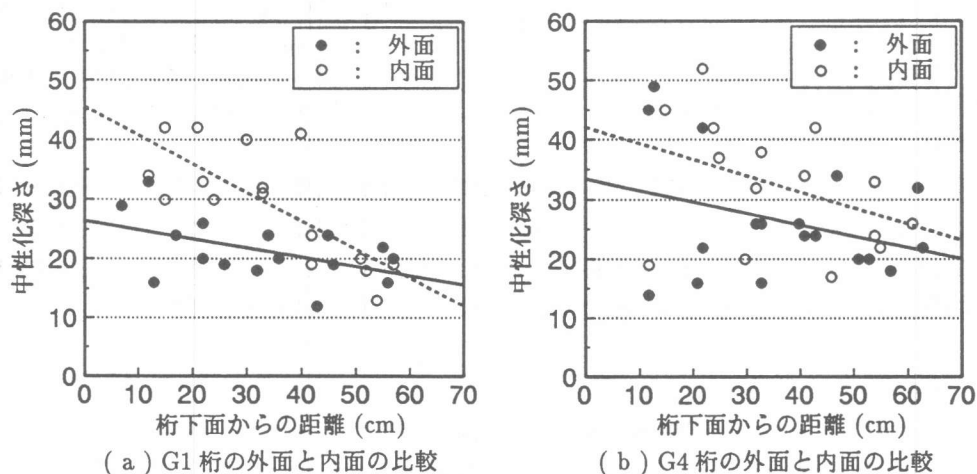


図-5 中性化深さと採取位置との関係

4. 塩分量の変化について

飛来塩分の影響を受けるコンクリート構造物の塩分量は、コンクリート表層から少し内部で最大となり、その位置から内部に向かって塩分量が減少し、表面部分においても塩分量が少なくなる傾向がある[5]とされている。これは、コンクリートの炭酸化によって引き起こされる塩化物の移動によるものである[4]。

ここでは、φ10cmのコアを桁下面より約20cmと40cmの点から採取し、J C Iの分析方法（硝酸銀滴定法）を用いて、全塩分量および可溶性塩分量の測定を行った。図-6は2つの桁のこれらの塩分量の分布を示したものであり、表-3に図-6の記号なら

表-3 図-6の記号と中性化深さ（cm）

採取位置 (底部より)	全塩分量	可溶性 塩分量	中性化深さ(G1)		中性化深さ(G4)	
			外面	内面	外面	内面
20cm	●	○	2.4	3.3	4.2	5.2
40cm	▲	△	2.4	2.4	2.0	2.4

びに中性化深さを示す。

図から明かなように、本橋の塩分量は土木学会の規定する塩分量の上限値(0.02%)をはるかに上回っている。2つの桁の塩分量の分布はともに前述したような傾向がみられる。すなわち、表層よりも幾分内側にピーク点が発生している。このピーク点と表-3の中性化深さを比較してみると、ピーク点は中性化深さよりもやや深い位置にあることが判る。また、塩分量は上部に比べ底部が大きく、最大では2倍にも達するところがある。

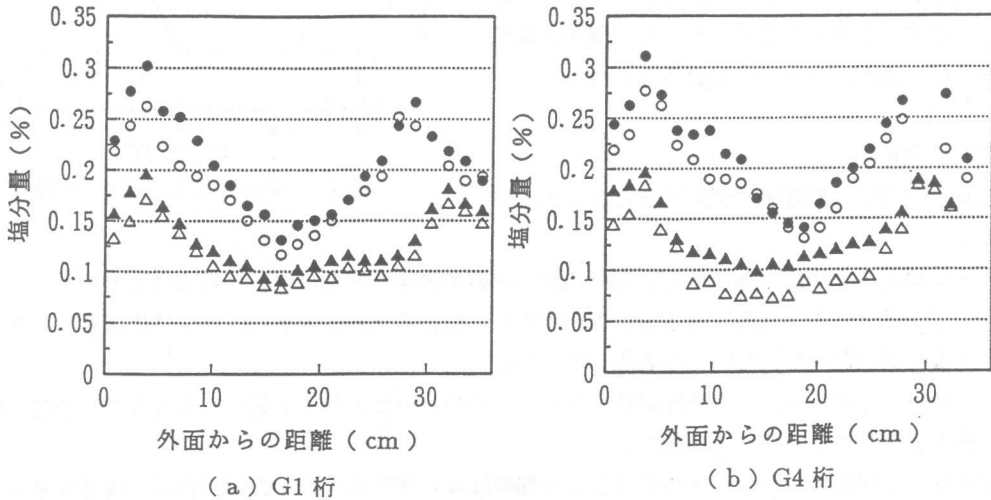


図-6 塩分量の分布

5. 中性化と材料性状

著者らは先に7体のコンクリート構造物の試料から、コンクリートの中性化と圧縮強度あるいは吸水率との関係式を提示した[6]。これらの関係式は中性化進行を供用年数で平均化した中性化速度と圧縮強度や吸水率との関係となっており、それらは式(3)と式(4)となる。

式(3)は線形化するために、圧縮強度に関する因子はその逆数となっている。

$$\text{中性化速度と圧縮強度の関係式: } V=108.4 \cdot S+0.325 \quad (3)$$

$$\text{中性化速度と吸水率の関係式: } V=0.299 \cdot A-1.00 \quad (4)$$

ここに、Vは中性化速度(mm/年)、Sは圧縮強度(kgf/cm²)の逆数、Aは吸水率(%)である。

本橋で得られた試料と上記の回帰式の比較を試みる。ただし、式(3)と式(4)の中性化速度は、中性化深さを供用年数で除した、いわば供用期間の平均的な速度であることから、上記の2つの式から得られた中性化速度に本橋の供用年数(51年)を乗ずると、中性化深さに換算できる。

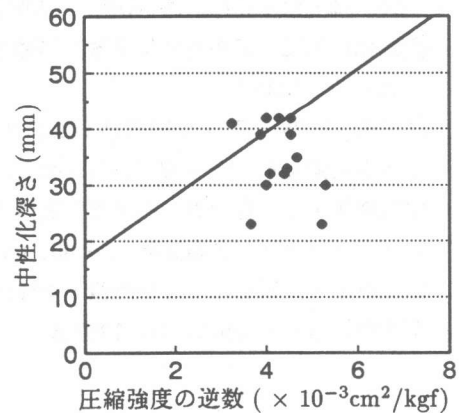


図-7 中性化深さと圧縮強度の関係

図-7は中性化深さと圧縮強度の逆数との関係を、図-8は中性化深さと吸水率との関係を示したものである。図中の実線はそれぞれ、式(3)と式(4)によるものである。

本試料が1つの橋梁から得たものであるため、図に明らかなように試験データが極めて狭い範囲に集約されている。このため、これらは上記の関係式に必ずしも符合してはいないが、関係式はほぼ特性値を表現しているものと言えよう。

6. まとめ

本論文で得られた成果を要約すると次のようになる。

- (1) 橋梁の中性化測定は、中性化進行の最も速い桁内面の底部について行うべきである。
- (2) 岸谷式と魚本・高田式を本橋に適用すると、岸谷式はおよそ平均的な中性化深さを、魚本・高田式は最大中性化深さを表現している。
- (3) 塩分量は桁上部よりも底部のほうが多く、その分布は既往の文献にあるように、中性化最深部の少し内部にピークがある。
- (4) 先に著者らが提示した中性化深さと圧縮強度ならびに吸水率との関係式は、ほぼ本橋にも適用できるものと思われる。

参考文献

- 1) 和泉意登志・喜多達夫・前田照信：中性化（コンクリート構造物の耐久性シリーズ）、技報堂出版、1988.3
- 2) 鄭載東・平井和喜・三橋博三：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、第1巻、第1号、pp.85-93、1990.1
- 3) 魚本健人・高田良章：コンクリート中の中性化速度に及ぼす要因、土木学会論文集、No.451/V-17、pp.119-128、1992.8
- 4) 小林一輔・白木亮司・河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮、コンクリート工学論文集、第1巻、第2号、pp.69-82、1990.7
- 5) 丸屋剛・SOMNUK T.・松岡康訓：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究、土木学会論文集、No.442/V-16、pp.81-90、1992.2
- 6) 中沢隆雄・今井富士夫・横田漢：実構造物におけるコンクリートの劣化損傷について、セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.440-445、1992.12
- 7) 佐伯竜彦・大賀宏行・長滝重義：中性化によるコンクリートの微細組織、土木学会論文集、第420号/V-13、pp.33-42、1990.8

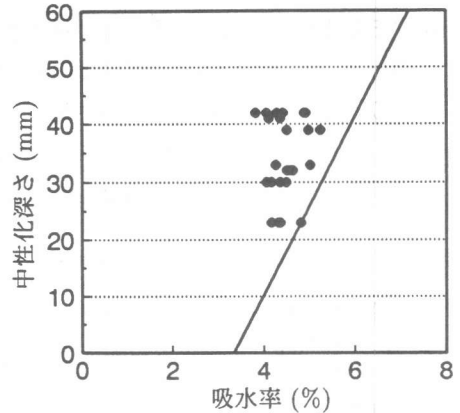


図-8 中性化深さと吸水率の関係